

항만준설토사 유효활용을 위한 오염도 평가

Assessment of Contamination of Harbor Dredged Materials for Beneficial Use

윤길림¹ Yoon, Gil-Lim

정우섭² Jeong, Woo-Seob

Abstract

Contamination level assessment of harbor dredged materials is carried out for beneficial use, which generated annually due to port construction and maintenance of harbor channel. The basic purpose of environmental risk assessment was a scientific approach to susceptibility of hazard risk to human's health from different dredged materials. And this paper proposes a guideline of safely beneficial use of dredged materials at both industrial area and residential area, generated from major port execution throughout a sound investigation of their contamination levels. Newly proposed guidelines were in general higher levels compared to both current guidelines of treatment and use of dredged materials and soil environment protection levels. Finally, environmental assessment results of dredged material contamination generated in major ports of Korea for beneficial use based on pre-assessment environmental levels show that some port's dredged materials contain heavy metals such as Cd, As, Cr and Zn, more than base levels which requires more precise contamination investigation. Others were found to be very appropriate for beneficial use.

요지

본 논문에서 매년 항만개발 및 항로유지의 목적으로 발생하는 준설토사의 유효활용을 위하여 주요 항만 준설토사에 대하여 오염현황을 조사 및 분석하였다. 그리고 준설물질별 인간의 건강에 대한 피해확률을 과학적으로 추정하는 위해성 평가를 실시하여 공업 및 주거지역에서 직접 인체에 대하여 안전하고 유효하게 활용할 수 있는 기준을 제시하였다. 제시한 기준은 기존의 준설토사 처리·활용기준 및 토양환경보전법상의 환경기준보다 엄격한 것으로 나타났다. 그리고 유효활용에 대한 사전평가를 실시할 수 있는 관련 기준을 근거로 국내 주요항만의 발생준설토사에 대한 오염도를 평가한 결과, 일부 항만에서 카드뮴(Cd), 비소(As), 크롬(Cr) 및 아연(Zn)이 환경기준을 초과하는 것으로 나타나 정밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 나타났지만 대부분 항만에서 발생한 준설토사는 유효활용이 가능한 것으로 나타났다.

Keywords : Beneficial use, Contamination level, Dredged materials, Environmental risk assessment, Port construction

1. 서론

항만의 유지와 관리, 항로개척 및 보수, 오염 해역의

정화 등을 목적으로 하는 매년 발생하는 준설토사량은 90년대 중반이후 급격히 증가하는 추세로 조사되었다.

그리고 발생한 준설토사의 대부분이 매립 또는 해양

1 정회원, 한국해양연구원, 책임연구원 (Member, Principal Researcher, KORDI)

2 정회원, 한국해양연구원, 연수연구원 (Member, Post-Doc, KORDI, jws2713@kordi.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

투기에 의존하여 처리, 처분되고 있는 곳으로 보고되고 있다(해양수산부, 2005). 그러나 발생준설토사의 해양 투기는 오염물질의 재확산으로 인하여 수중 생태계에 악영향을 미칠 우려가 있으며 매립 및 투기는 오염된 준설토사에 의한 주위환경에 2차 환경오염을 야기시킬 우려가 있다. 준설토사의 처리 방법에 따른 부작용이 예상되지만 최근에 이루어지고 있는 대형 항만개발 과정에서 준설토사의 평가 및 준설토사 투기로 인한 영향을 저감하는 방안 등이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 2007년 8월 현재 준설토사는 해양오염방지법(제 35조 제1항 관련)상 육지에서 처리가 곤란한 폐기물로서 분류되고 있으며 준설토사의 처리, 처분 및 유효활용에 관한 법률이나 오염도 조사, 오염항목에 관한 규제치 등이 마련되어 있지 않은 상황이다. 2002년도에 실시한 준설토사의 기초오염도 조사결과에서도 주요 항만의 준설토사는 대부분 유기물 및 영양염류 또는 중금속으로 오염되어 있는 것으로 평가(해양수산부, 2003)되었다.

일부항만의 준설토사의 경우 오염도가 낮아 유효활용 가능성이 높은 것으로 평가되었지만 활용에 대한 법적인 기준이 제시되지 못하고 있는 상황이다.

본 논문에서는 현장조사 및 문헌자료를 병행하여 우리나라 주요항만에서 발생하는 준설토사에 함유된 주요오염물질의 종류 및 오염도를 조사하였고 준설토사에 함유된 오염물질들에 의한 인체 건강에 대한 위해성을 평가하여 안전하게 활용하기 위한 오염물질 기준을 설정하고 관련기준의 상호 비교 및 평가를 통하여 주요항만 준설토사의 유효활용 가능성을 평가하였다.

2. 국내주요항만의 오염도 조사

2.1 오염도 조사항목의 선정

준설토사의 유효활용을 위한 환경기준의 수립을 위해서는 향후 발생될 준설토사에 대한 오염도 평가가 선행되어야 한다. 국내에서는 아직 준설토사의 오염도에 대한 구체적인 법적인 분석 항목이 마련되어 있지 못한 상태이므로 본 논문에서는 기존의 분석 사례를 이용하

여 유추함으로써 분석항목을 선정하였다. 마산만 중금속 분석 사례 및 부산 신항 건설에 따른 준설토사의 해저질분석 사례를 통해 준설토사의 오염도 분석항목을 선정 작업을 수행하였다(해양수산부, 1997). 중금속류는 해수의 장기적 오염원으로 작용할 뿐만 아니라 생물체내에 축적되어 독성작용을 나타내기도 한다. 마산만의 분석항목으로 중금속류인 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Mg, Zn을 분석항목으로 선정하였다. 중금속류 외에 특정분석항목으로는 부산 신항건설해역의 해저질 중 특정 유해물질 조사 결과를 토대로 하여 내분비계 장애물질로 PCBs를 선정하였다. 그리고 국제적 기준에 부합하기 위해 국제해사기구(IMO)가 2000년에 발표한 준설토물의 오염농도분석 자료를 분석항목 선정에 참고하였다(IMO, 2000).

본 논문에서는 마산만과 국제 해사 기구의 자료를 근거로 준설토사의 분석항목을 표 1에 나타난 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Mg, Zn, PCBs, COD, T-N, T-P로 선정하였다.

2.2 준설토사의 오염도 조사결과

본 논문에서 오염도분석은 해양환경공정시험방법(해양수산부, 2005)상의 해저퇴적물 또는 해양오염퇴적물 조사지침서(해양수산부, 2006)에 의거하여 시료를 채취하고 분석하였다. 표 2는 장래준설토계획이 수립되어 있는 주요항만 중 12개항만을 선정하여 준설토사의 오염현황을 조사한 결과이며 조사지점은 향후 항만계획 등에 의한 준설토계획이 예정된 지역을 중심으로 선정하였다.

Cd는 조사지역에서 0.088~5.487mg/kg, Cu는 조사대상항만에서 8.603~39.790mg/kg, As는 2.868~9.678mg/kg, Hg 농도는 N.D~0.130mg/kg, Pb 농도는 인천신항이 18.447 mg/kg으로 가장 낮은 농도를 나타냈고, 울산신항이 45.594mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타냈다. Cr농도는 30.913~52.452mg/kg, Zn 농도는 42.838~104.517mg/kg, 유기염소계 화합물인 PCB는 N.D~0.210µg/kg 범위로 조사되었다.

해저퇴적물 중 유기물량은 퇴적물의 환경을 평가하

표 1. 준설토사의 분석평가항목 대상

구분 \ 항목	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Mg	Zn	PCBs	COD	T-N	T-P
마산만	●	●	●	●	●	●	●	●				
국제해사기구	●			●	●	●		●	●	●	●	●

는데 중요한 척도 중의 하나로 사용된다. 본 조사지역의 COD 조사결과는 6,011.0~16,115.0mg/kg범위로 조사되었으며, 인천신항 조사지역에서 가장 낮은 농도를 나타냈고, 속초신항에서 가장 높은 농도로 유기물 오염이 가장 심한 것으로 조사되었다. 또한, COD와 마찬가지로 저질의 유기물량을 나타내는 지표중의 하나인 강열감

량 조사결과는 3.5~7.7% 범위로 조사되었으며, 인천신항 조사지역에서 가장 낮은 농도를 나타냈고, 광양항에서 가장 높은 농도로 조사되었다.

유기물 조사결과를 살펴볼때 속초신항, 평택항, 광양항은 유기물 오염도가 높은 것으로 나타났으며, 군장항, 대산항, 인천신항은 상대적으로 오염도가 낮은 것으로

표 2. 조사항만 준설토사의 중금속 및 유해물질 조사결과(해양수산부, 2007)

구 분	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Mg	Zn	PCB	COD	T-N	T-P	강열 감량
단 위	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
군장항	0.152	18.837	7.848	0.130	20.436	44.795	-	52.213	0.090	6,802.0	-	-	4.0
대산항	0.139	18.103	2.868	0.020	22.492	43.379	-	45.172	0.130	8,706.0	-	-	4.3
목포신항	0.176	39.790	3.341	0.037	31.977	52.452	-	45.009	0.210	10,934.0	-	-	4.3
부산신항	0.311	19.132	4.139	0.023	26.830	39.833	-	100.737	0.200	13,129.0	-	-	4.8
여수신항	0.228	23.092	3.443	0.033	26.387	43.162	-	104.517	0.210	11,690.0	-	-	4.9
속초신항	0.258	24.370	3.476	0.035	40.550	35.150	-	68.647	N.D	16,115.0	-	-	6.5
영일신항	0.228	29.236	3.942	0.017	40.146	27.367	-	56.548	0.150	8,009.0	-	-	4.2
울산신항	5.487	33.959	9.259	0.010	45.594	45.364	-	57.824	0.160	12,235.0	-	-	4.7
인천신항	0.088	8.603	3.133	N-D	18.447	32.847	-	55.637	N.D	6,011.0	-	-	3.5
평택항	0.141	28.561	3.098	0.003	24.549	45.950	-	77.751	N.D	15,854.0	-	-	6.0
광양항	0.284	21.724	3.953	0.022	30.549	40.378	-	95.975	0.200	12,514.6	-	-	7.7
부산항	0.164	20.884	9.678	0.060	21.521	30.913	-	42.838	0.120	8,107.4	-	-	7.6

표 3. 문헌자료에 따른 준설토사의 오염도 조사결과(해양수산부, 1997)

구 분	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Mg	Zn	PCB	COD	T-N	T-P	강열 감량	
단 위	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	
유지 준설토사	부산 북항	1.15	8.29	0.48	0.16	N.D	18.53	7986	50.09	N.D	7,212	22.6	0.23	3.25
	부산 감천항	2.21	5.23	N.D	0.2	N.D	54.5	13867	88.84	N.D	13,500	24.6	1.36	4.48
	장항항	2.19	11.47	0.98	0.81	7.61	53.97	11080	86.82	N.D	8,430	166	3.03	2.76
	광양 4항로	2.31	3.39	1.79	1.41	N.D	42.13	12192	67.83	N.D	9,472	35.5	3.26	3.37
	진해	-	4.5	-	-	N.D	4.1	-	-	N.D	18,332	402	0.4	8.80
	마산	-	3.6	-	-	N.D	8.4	-	-	N.D	22,731	376	0.06	11.36
	삼천	-	2	-	-	N.D	3.6	-	-	N.D	9,745	472	0.04	5.12
	군산 (내항)	-	5.7	-	-	N.D	11.2	-	-	N.D	21,234	251	0.2	4.91
군산 (외항)	-	2.4	-	-	N.D	5	-	-	N.D	16,335	193	0.04	9.05	
오염 우심 준설토사	주문 진항	7.5	64.2	N.D	-	3.9	1.68	-	-	-	13,632	105.477	6.0	5.93
개발 준설토사	군산항	2.59	18.34	3.94	1.62	13.24	67.51	12,555	114.73	-	9,049	112.4	0.47	2.77
	이판장	2.42	23.55	3.13	1.58	11.89	66.69	10,967	106.58	-	16,487	144	0.49	2.88
	동부두	2.29	12.40	2.64	0.22	10.27	61.58	11,355	96.08	-	7,432	41.5	2.46	2.46
	서부두	1.79	20.24	1.50	2.40	8.68	257.56	7,047	47.88	-	1,290	31.5	2.3	2.14
	5부두	2.12	17.91	3.75	3.29	19.93	65.22	11,234	64.98	-	610	53.6	2.8	2.75
광양항	0.86	3.03	0.26	0.14	ND	59.55	3,093	17.66	-	303	57.8	4.1	1.4	

나타났다. 부산항의 경우 강열감량과 COD 조사결과를 보면 강열감량은 7.6%로 높았지만 COD는 8,107.4mg/kg으로 낮게 나타났다. 이는 유기물 함량은 높으나 생물학적으로 분해가 잘되는 유기물로 이루어졌다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 오염현황조사 및 과거의 문헌자료를 국내 주요 항만의 준설목적별(유지준설, 오염우심해역, 개발준설 순)로 분류하여 각 항만의 오염도를 조사하였다.

표 3은 과거 문헌자료(해양수산부, 1997)를 통하여 준설목적별로 16개 항만에 대한 오염물질별 농도를 조사한 결과이다. 마산항, 군산(외항) 및 주문진항을 제외한 항구의 경우 강열감량은 장래준설계획이 수립된 항만에 대한 조사결과 보다 낮게 나타나 유기오염물의 퇴적이 시간의 경과에 따라 많이 발생한 것으로 나타났다.

3. 환경 위해성에 따른 오염기준 제시

3.1 환경 위해성 평가방법 및 절차

인체의 건강에 대한 위해성 평가는 어떤 독성물질이나 위험 상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 혹은 집단의 건강 피해 확률을 추정하는 과학적인 과정으로 사람이 환경적인 위험에 노출되었을 경우, 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정이다. 위해성 평가 과정은 위해성 확인단계, 노출평가, 용량-반응 평가 및 위해도 결정의 주요 4단계를 통해 수행된다.

첫 번째 위해성 확인 단계는 위해성 평가의 모든 단계에서 필요로 하는 기초자료를 수집하는 단계로 본 논문에서는 위해성 확인 단계에서 준설작업이 진행되고 있는 항만에서 발생된 준설토사를 물리, 화학적으로 분석하여 준설토사에 함유된 오염물질의 종류와 양에 대해 조사를 하였다.

두 번째 단계인 노출평가 단계는 실제적인 노출환경으로부터 어느 정도의 위해성에 처해 있는지를 알기 위한 단계로서 본 논문에서는 준설토사의 유효활용에 대한 시나리오를 대상으로 하여 노출평가를 실시하였다. 이러한 노출평가 단계에서는 노출의 강도, 빈도 및 기간, 그리고 노출 경로 등에 대한 요소들이 고려되어야 한다. 또한 발암물질과 비발암 물질에 따른 독성학적 자료가 언급이 되어야 하며 발암물질의 경우는 누적 위해성이 비발암 물질의 경우는 누적 효과를 고려해야 한다. 누적 위해성은 발암물질의 경우 더 중요하며, 현재 누적 위해성은 10^{-6} 으로 언급하고 있으며 여기에 대한 자세한

설명은 용량-반응 평가 단계에서 언급하였다. 독성 판단의 유무가 용량-반응 평가단계에서 결정되므로 독성학적 자료는 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 발암물질의 경우는 독성학적 자료는 각 사안마다 독립적인 실험을 통하여 생산된, 현장의 특수성을 반영하는 자료를 이용하는 것이 가장 이상적이겠지만 현실적으로는 매우 어려운 일이므로 대부분 기존의 표준화된 자료를 이용한다. 이런 표준화된 자료는 일반적으로 US EPA(1992b) 자료가 많이 이용된다. 이 단계에서는 외국의 문헌을 통한 식들을 이용하여 노출 빈도와 기간을 설정하여 적용하였으며 각 노출별로 식을 통해 그 값을 산정하였다(US EPA, 1995; US EPA 1996).

세 번째 단계인 용량-반응 단계는 어떤 화학물질이 노출된 개체에 미치는 유해한 결과에 대한 잠재력을 평가하는 것으로 노출과 유해한 영향이 나타날 가능성 사이의 관계를 측정하는 것이다. 위해 독성 영향은 발암 및 비발암으로 구분하는 방법으로 조사하고자 하는 준설토사에 함유된 오염물질을 분류하여 그 독성의 영향을 예측하였다.

마지막 단계인 위해도 결정 단계는 용량-반응 평가와 노출 평가의 결과를 종합하는 단계이다. 이 단계에서는 세 번째 단계인 각 경로별 노출평가 단계를 종합하여 정리하였다.

3.2 오염물질의 용량에 따른 반응

용량-반응 평가 단계에서는 i) 준설토사에 함유된 오염물질의 농도별 위해성에 관해 정의하였으며, ii) 오염물질을 발암, 비발암물질로 분류하고 이들이 인체에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

3.2.1 준설토사의 오염도에 따른 위해성

본 논문에서 준설토사에 함유된 오염물질의 농도별 위해성은 US EPA에서 제시한 것과 같이 Screening level 과 Response level을 기준으로 분류하였다(US EPA, 1994). 준설토사에 함유된 오염물의 농도가 “0”에서 Screening levels(SLs)까지의 범위일 때는 오염허용수준으로 정화가 불필요한 것으로 보았다. 오염물질의 함량이 SLs에서 RLs의 범위일 때는 위해성이 우려되는 수준으로 현장 특수성을 반영한 위해성 평가를 통하여 목표 정화수준 설정 과정이 필요한 상황이다.

본 논문에서 설정하고자 하는 오염도 기준은 인체에

아무런 영향없이 안전하게 활용이 가능한 오염도 기준인 SLs 값이다. 준설토사의 오염도에 따른 위해성은 그림 1에 도식화 하였다.

준설토사에 함유한 특정 화학물질이 위해성을 발현하기 위해서는 토양 또는 퇴적물에 함유된 물질의 농도가 안전한 노출 허용 수준을 초과하여야 한다. 오염물질이 수용체로 전달 될 수 있는 완전한 노출경로가 있어야 하고, 전달된 오염물질과 접촉하는 수용체가 있어야 한다. 이러한 방법으로 준설토사의 위해도를 나타내기 위한 값이 SSLs(Sediment Screening Level)이다. 아래 식(1)은 SSLs를 계산하기 위한 개념적인 수식으로서 준설토사의 이용도와 노출경로를 고려하여 EPA의 화학적 독성학 자료를 바탕으로 한 것으로서 발암성 물질에 대한 것과 비발암성 물질에 사용하는 것이 구분된다(US EPA, 1996).

$$SSL_s = \frac{\text{총 노출기간 동안 위해성을 나타내지 않는 오염물질섭취량}}{\text{노출기간동안 직접노출에 의한 총 토양}} = \frac{\text{위해성factor} \times \text{평균 몸무게} \times \text{위해성을 나타내지 않는 단위} \times \text{몸부게당 섭취율}}{\text{토양 섭취율} \times \text{직접 노출 기간}}$$

(1)

3.2.2 발암성 물질과 비발암성 물질의 정의

SSLs는 발암성과 비발암성 물질을 구분하여 계산한다. 발암물질의 분류는 역학조사에 의한 증거가 확보된 발암물질과 동물실험 자료에 의한 증거가 있는 비발암물질은 발암물질을 분류하는 근거이다. 표 4는 발암물질이 인체에 미치는 영향을 나타내고 있으며 인체독성 영향은 물질의 종류 및 양에 따라 달라진다(US EPA 1994).

3.3 준설토사 노출의 평가

준설토사의 노출평가에서는 i) 공업지역 및 주거지역으로 준설토사의 재활용 용도를 구분하여 준설토사에 함유된 오염물질에 대한 노출 시나리오를 설정하고 ii) 각 노출경로에 따른 SSLs를 발암 및 비발암 물질로 구분하여 산정하였다.

3.3.1 오염물질의 노출경로

노출경로를 고려할 때 공업 및 주거지역의 노출경로를 고려하였다. 이것은 전형적인 노출경로로서 오염도 양을 표토(0-2cm)와 심토로 나누어서 시료 채취 및 분석

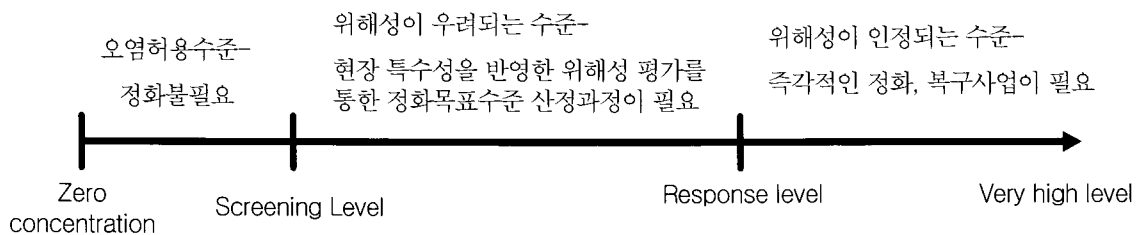


그림 1. 농도별에 따른 위해성 수준

표 4. 발암물질의 인체 독성

오염물질	증상
VOCs	
벤젠	졸음, 현기증, 두통
클로로포름	
살충제	
DDD	신경 내분비계 장애
DDE	
DDT	
중금속	
As	설사, 변비, 구역질, 결막염, 염색체의 장애
Cd	급성중독 : 목의 자극감, 기침, 흉부 이상감, 호흡곤란 만성중독 : 폐기종, 신장해, 단백질 3대 증상의 만성 중독 증상
Cr6+	기침, 녹황색담, 호흡곤란, 폐출혈
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	기타 호흡기 장애, 신경 내분비 장애

을 하도록 권장하고 있다(US EPA, 1996). 표 5는 위해성 평가시 고려한 노출경로에 대한 시나리오를 나타내고 있으며 주거지역의 경우 직접섭취, 피부접촉을 통한 흡수, 비산먼지/휘발성 물질의 흡입, 지하수를 통한 오염물질의 섭취를 포함하고 있다(US EPA, 1994). 공업지역의 경우는 실외에서 일하는 노동자와 실내에서 일하는 노동자를 분류하여 노출경로를 고려하는데, 실외에서 일하는 노동자의 경우 오염된 토양의 직접섭취, 피부접촉을 통한 흡수, 휘발성 물질과 비산먼지의 흡입, 오염된 지하수의 섭취를 고려하였다. 그러나 실내 노동자의 경우는 토양의 직접 섭취와 오염된 지하수의 섭취만을 고려하였다.

3.3.2 노출경로에 따른 위해성의 평가

공업 지역의 경우 실내 노동자와 실외 노동자로 구분하여 발암성 및 비발암성 물질의 SSLs를 산정하였다. 실외 노동자의 경우 오랜 시간 노출되어 있으며 대부분을 실외에서 시간을 보낸다. 일반적으로 옥외 노동자의 경우 표

면과 얇은 표면 토양에서의 접촉, 흡입이 대부분이다. 목표위해성 수준을 10^{-6} 으로 설정하였으며 표 6에 나타나있듯이 실외 노동자의 경우 토양 섭취율은 100mg/day로 예상하고 있으며 이것은 토양섭취, 피부 접촉에 의한 흡수, 비산 먼지의 흡입, 옥외의 휘발성 물질의 흡입, 오염된 지하수의 섭취 등이 대부분이다. 반면 실내 노동자의 경우 대부분 실내에서 보내는 경우가 많다. 그러므로 실내 노동자는 실외 노동자처럼 직접적으로 토양을 접촉하지는 않는다. 그러므로 SSLs 산정시 실내 노동자의 경우는 토양내의 오염물질이 피부접촉에 의해 흡수되는 것을 고려하지 않는다. 그러나 실내로 유입되는 먼지나 오염된 지하수의 섭취, 실내에 존재하는 오염된 공기로부터 노출되어 있다. 노출빈도의 경우는 옥외에서 일하는 노동자의 경우 노출빈도를 225day/year, 실내노동자의 경우 250days/year로 가정하였는데 이 값은 노동기준에 따라 일주일에 주 5일, 일년에 50주를 기준으로 한 것이다(휴가기간은 두 주로 가정). 그리고 평균 몸무게 70kg(국민표준체위 조사보고서, 1997), 노출기간은 남

표 5. 환경위해성 평가시 고려한 노출경로 시나리오

잠재적 노출 경로	공업지역				주거지역	
	실외 노동자		실내 노동자		표토	심토
	표토	심토	표토	심토		
직접섭취(소화기)	●	●	●		●	
피부접촉에 의한 흡수	●	●			●	
휘발성물질의 흡입		●				●
비산먼지의 흡입	●				●	
오염된 지하수 섭취		●		●		●

표 6. 공업지역의 SLs 평가를 위한 노출인자

항 목	수용체	
	실외 노동자	실내노동자
노출 특성	다량의 토양 노출 높은 토양 흡입율 오랜 기간의 노출	토양 노출의 최소 오랜 기간의 노출
노출 경로	섭취(토양 표면) 피부접촉(토양 표면) 흡입 지하수 오염에 의한 섭취	섭취 (내부먼지) 흡입(내부증기) 오염된 지하수 섭취
노출인자		
노출 빈도(d/yr)	225	250
노출 기간(yr)	25	25
토양 섭취율(mg/d)	100	50
흡입율(m ³ /d)	20	20
몸무게(kg)	70	70
수명(yr)	70	70

자의 평균재직기간인 25년을 가정하였다(통계청, 2005). 표 6은 본 논문에서 오염도기준의 설정을 위한 실내 및 실외 노동자의 노출경로의 특징과 각 조건에 따른 가정치들을 나타내고 있다.

공업지역의 발암성 SSLs(소화기를 통한 직접섭취)는 식 (2)를 이용하여 계산하였다(USEPA, 1994).

$$\text{Screening level} = \frac{\text{TR} \times \text{BW} \times \text{AT} \times 365 \text{d/yr}}{\text{EF} \times \text{ED} \times 10^{-6} \text{kg/mg} \times \text{SFo} \times \text{IR}} \quad (2)$$

여기서, TR/발암효력계수 (무차원) : 10^{-6}
 BW/평균체중(kg) : 70
 AT/평균수명(years) : 70
 EF/노출빈도(days/year)
 실외노동자/실내노동자 : 225/250
 ED/노출기간(years)
 실외노동자 / 실내노동자 : 25 / 25
 SFo/직접섭취에 따른 발암농도(mg/kg/d) : 화학물질에 따른 특성치
 IR/토양섭취율(mg/d)
 실외노동자/실내노동자 : 100/50

주거지역에 대한 발암성 물질의 경우 성인과 어린이 모두를 고려하여 산정하였으나 비발암성 물질에 대한 위해성 평가에서 인간의 소화기를 통한 준설토사의 직접섭취의 경우 준설토사에 의한 screening level은 6살이나 그 이전의 나이를 고려하여 수식에 필요한 인자들을 결정하였다. 이것은 부주의로 물체나 손을 입에 넣는 행동으로 일어날 수 있고, 섭취를 하게 되는 나이가 6살 이전으로 보기 때문이다. 또한 어른들의 경우에 있어서도 음식이나 담배, 손에 묻어 있는 흙이나 먼지입자로 토양을 섭취할 수도 있다. 식 (3)은 주거지역의 비발암성 SSLs(소화기를 통한 섭취)를 계산하기 위한 수식이다(US EPA, 1994).

$$\text{Screening level} = \frac{\text{THQ} \times \text{BW} \times \text{AT} \times 365 \text{d/yr}}{1/\text{RfDo} \times 10^{-6} \text{kg/mg} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{IR}} \quad (3)$$

여기서, THQ/목표위험지수(무차원) : 1
 BW/체중 : 15
 AT/대상연령(yr) : 6
 RfDo/직접섭취에 따른 기준 노출량(mg/kg/d) : 화학물질에 따른 특성치
 EF/노출빈도(d/yr) : 350

ED/노출기간(years) : 6
 IR/토양섭취율(mg/d) : 200

미국 환경청(US EPA)의 위해성 평가시 산업 환경지역에서는 50mg/day, 주거지역과 농업 지역 환경에서는 100mg/day를 섭취량으로 많이 사용하여 왔으며 최근의 미국 환경청에서 제시한 성인의 평균 토양섭취량도 50 mg/day를 권고하고 있다. 나이 여섯살을 기준으로 한 토양 섭취량의 경우는 200mg/d를 권고하고 있다. 식 (3)에 나타난 THQ는 비발암성 물질의 경우에 사용하는 위험도 지수로서 오염수준이 1 이하인 경우에는 그 위험도가 발생할 가능성이 없음을 제시해준다. 즉, 오염수준이 1 이상이 되게 되면 유해영향(독성)이 발현하는 것을 제시하는 값이다. BW의 경우는 평균 몸무게로서 6세까지를 기준으로 하므로 6세 까지의 평균 몸무게를 적용하며 평균시간(AT: average time)은 인체가 오염물질의 영향을 받는 기간을 말하는 것으로 6살을 기준으로 하므로 6년이 되는 것이다. 평균기간은 주로 일로 표현하므로 365d/yr을 곱해준다.

RfDo는 비발암성 물질의 경우에 적용되는 값으로서 비발암성 오염물질을 인간집단이 평생 동안 같은 농도로 매일 섭취(소화기를 통한 섭취)하였을 때를 해를 일으키지 않는 수준의 농도 예상치를 말한다. 노출 기간(ED : exposure duration)의 경우는 토양섭취를 하는 기간을 말한다. IR(soil ingestion rate : 토양 섭취율)은 위에서도 언급했듯이 어린이의 경우는 200mg/d를 권고하고 있기 때문에 토양 섭취율은 200mg/d를 사용하였다.

3.4 준설토사의 위해도 결정

준설토사를 공업지역 및 주거지역에 유효활용할 경우 SSLs는 총 노출기간 동안 위해성을 나타내지 않는 오염물질 섭취량을 노출기간동안 총 토양 노출량으로 나누었으며 표 7에 나타내었다. 여기서 “총 노출기간동안 총 준설토사 노출량”은 모든 노출경로의 위해도를 합한 값이다. 이때 고려하여야 할 노출 경로는 오염물질의 특성에 따라 달라진다. 크롬의 경우 인체에 위해성을 주는 노출경로는 호흡을 통한 비산먼지의 섭취와 소화기를 통한 직접섭취이다. 이 때 호흡을 통한 비산먼지의 섭취는 발암성으로 그리고 소화기를 통한 크롬의 직접섭취는 비발암성으로 분류된다. 따라서, 크롬에 의한 주거지역의 SSLs는 비산먼지의 섭취에 의한 위해도와 소

표 7. 총 위해도를 고려한 SSLs(단위: mg/kg)(※ 진한부분은 발암성 물질을 나타냄)

	공업지역 SSLs		주거지역 SSLs
	실외노동자	실내노동자	
휘발성유기화합물			
벤젠(Benzene)	1.41	260	0.67
클로로포름(Chloroform)	0.51	1200	0.13
살충제			
DDD	10.9	30	2.44
DDE	7.84	21	1.72
DDT	7.84	21	1.74
엔드린(Endrin)	205	613	18.4
PCBs	0.56	3.60	0.32
중금속			
구리(Cu)	54.1	74.3	31.3
비소(As)	1.76	4.80	0.39
바륨(Ba)	790	2,046	548
카드뮴(Cd)	3.5	5.2	1.7
크롬(Cr)	34.5	37.1	26.7
망간(Mn)	530	954	188
수은(Hg)	1.7	2.4	1.3
납(Pb)	57.5	102.3	39.1
아연(Zn)	34.2	61.3	23.5
기타			
총질소(T-N)	790	2,046	548
총인(T-P)	530	954	188

화기를 통한 직접섭취 위해도의 합으로서 평가하였다. 벤젠은 휘발성 물질에 의한 흡입과 소화기를 통한 직접 섭취 그리고 피부를 통한 섭취에 의한 위해도의 합으로 산정하였다. 클로로포름은 휘발성 물질에 의한 흡입과 소화기를 통한 직접섭취에 의한 위해도의 합으로 산정하였다.

DDD, DDE, DDT, 비소 그리고 수은 소화기를 통한 직접섭취와 피부접촉을 통한 섭취에 의한 위해도의 합으로서 산정하였으며, 바륨, 망간, 아연 등은 소화기를 통한 섭취의 위해도만으로 SSLs를 산정하였다.

4. 준설토사의 유효활용성 평가

4.1 관련 기준의 비교

본 논문에서는 위해성 평가를 통하여 제시한 오염물질별 SSLs를 준설토사의 유효활용성 평가시 적용될 수 있는 기준인 준설토사 처리 및 활용기준(해양수산부, 2007) 및 토양환경보전법상의 관련기준(환경부, 2005)과 비교하였다. 준설토사 처리 및 활용기준의 경우 국내 퇴적

물의 천연부존량과 상이한 기준으로 인하여 발생할 수 있는 문제점을 해소하여 기준의 실효성을 부여하기 위하여 오염퇴적물 정화기준(해양수산부, 2005)을 고려하였다. 그리고 외국의 준설토사의 처리 및 활용과 관련된 기준은 퇴적물의 화학적 분석 및 생물학적 영향에 기초를 두고 있으나 국내의 경우 퇴적물의 화학적 분석은 이루어졌으나 생물영향과 연계된 자료의 부족으로 자체적 기준을 개발하는 것은 현실적으로 불가능하므로 외국의 기준을 선별하고 분석하여 국내현실에 적합한 환경기준을 설정하였다. 표 8은 각 기준에 따른 오염물질의 기준치들을 나타내고 있다. 발암물질인 카드뮴(Cd)의 경우 주거지역의 SSLs는 준설토사 처리 및 활용기준의 활용가능기준 및 토양환경보전기준 “가” 지역의 하위기준인 오염우려기준과 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 공업지역의 SSLs는 준설토사 처리 및 활용기준의 가능기준을 초과하고 토양환경보전기준 “나” 지역의 하위기준을 만족하는 것으로 나타났다. 비발암성물질인 아연(Zn)의 경우 주거지역의 SSLs는 준설토사 처리 및 활용기준과 토양환경보전법의 하위기준에 비하여 약 8~10%정도의 수준이며 공업지역의 SSLs는 5~9%

표 8. 각 기준에 따른 오염물질의 기준치 비교(단위: mg/kg)(※ 진한부분은 발암성 물질을 나타냄)

오염물질	활용기준		위해성평가에 의한 기준		준설토사 처리 및 활용기준		토양환경보전기준			
	공업지역 SSLs		주거지역 SSLs	활용 가능 기준	활용 우려 기준	오염우려기준		오염대책기준		
	실외 노동자	실내 노동자				가 지역	나 지역	가 지역	나 지역	
카드뮴(Cd)	3.5	5.2	1.7	1.55	11.8	1.5	12	4	30	
구리(Cu)	54.1	74.3	31.3	60	278	50	200	125	500	
비소(As)	1.76	4.81	0.39	21	65	6	20	15	50	
수은(Hg)	1.7	2.4	1.3	0.32	2.47	4	16	10	40	
납(Pb)	57.5	102.3	39.1	62	404	100	400	300	1,000	
크롬(Cr)	34.5	37.1	26.7	134	652	4	12	10	30	
아연(Zn)	34.2	61.3	23.5	247.7	615	300	800	700	2,000	
PCBs	0.56	3.60	0.32	28.8	300	-	-	-	-	
총질소(T-N)	790	2,046	548	1,500	-	-	-	-	-	
총인(T-P)	530	954	188	500	-	-	-	-	-	

의 수준으로 매우 엄격한 것으로 나타났다.

본 논문에서 산정한 SSLs가 관련 기준과 비교하여 값이 상대적으로 적은 것은 발암효력계수(TR)를 10^{-6} 으로 설정하였기 때문이다. 미국의 식품의약청(US FDA)에서는 이론적인 발암위해성이 10^{-4} 이면 만족할 만한 것으로 간주하지만 10^{-6} 을 적용한 것은 각 오염물질과 노출 경로에 대한 개별 목표 위해성을 10^{-6} 으로 정할 경우 복합오염과 다중노출경로에 의한 누적 위해성을 고려할 수 있기 때문이다(US EPA 1996). 미국의 경우 주(state) 및 오염물질에 따라서 목표위해성 수준을 10^{-5} 혹은 10^{-4} 으로 권장하기도 하므로 이 값을 증가시킬 경우 본 논문에서 제시한 SSLs는 다른 관련기준에 근접할 것으로 판단된다.

4.2 국내 준설토사의 오염도 평가

표 9는 공업지역에서 준설토사의 유효활용가능성을 평가하기 위하여 장래 준설계획이 수립된 주요항만 12개소와 문헌조사를 통하여 얻은 오염도 조사결과 자료를 위해성평가에 의한 기준, 준설토사 처리·활용기준 및 토양환경보전법상의 관련기준 등을 이용하여 오염도를 평가하였다. 탈수 및 건조 등의 일반적 처리외 특별한 처리과정을 생략하기 위하여 하위기준을 중심으로 평가를 실시하였으며 공업지역의 경우 토양환경보전법상의 관련기준에서 “나”지역 그리고 위해성 평가를 통하여 제시된 기준에서 토양에 의한 섭취율이 높은 실외노동자를 기준으로 하였다.

주문진항의 오염우심준설토사는 카드뮴(Cd) 및 구리

(Cu)에 대하여 위해성 평가에 의한 기준과 준설토사 처리·활용기준에 대하여 하위기준을 초과하여 부적합한 것으로 나타났으나 토양환경기준에 대해서는 적합한 것으로 나타났다. 카드뮴(Cd)은 준설토사처리·활용기준에 대하여 조사항만중 10개소가 부적합한 것으로 나타났으며 다른 기준에 대해서는 적합한 것으로 나타났다. 비소(As)의 경우 조사항만 23개소중 6개소를 제외한 나머지가 위해성 평가에 의한 기준에 적합하지 않은 것으로 나타났으나 다른 기준에 대해서는 적합한 것으로 나타났다. 그리고 크롬(Cr)의 경우 전체조사 항만중 위해성 평가에 의한 기준에 대해서 10개소, 토양환경기준에 대해서 6개소가 적합한 것으로 나타났으나 준설토사 처리·활용기준에 대해서는 군산항 서부두를 제외한 모두가 기준에 적합한 것으로 나타났다. 아연(Zn)의 경우 광양항을 제외한 모든 항만 위해성 평가를 통하여 설정된 기준에 부적합한 것으로 나타났지만 나머지 기준에 대해서는 모든 조사항만이 적합한 것으로 나타났다. 그 외 오염물질에 대하여 대부분 항만의 준설토사의 오염도는 평가기준에 대하여 적합한 것으로 나타났다.

국내 발생준설토사의 오염물질중 카드뮴(Cd), 비소(As), 크롬(Cr) 및 아연(Zn)에 대하여 보다 정밀한 조사 분석연구가 필요할 것으로 판단되며 유효활용시 환경위해성 및 토양환경기준에 적합하지 않은 준설토사는 사전 처리하여 크롬, 카드뮴 및 비소의 함량을 감소시키거나, 시멘트로 고형화하는 방법 등을 사용하여 오염물질에 의한 노출을 최소화하기 위한 대책이 필요한 것으로 평가되었다.

표 9. 조사항만 준설토사의 오염도 평가(○: 적합, ×: 부적합)

구분	Cd			Cu			As			Hg			Pb			Cr			Zn			PCBs			T-N			T-P						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C				
기준	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
군장항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
대산항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
목포신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
부산신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
여수신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
속초신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
영일신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
울산신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
인천신항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
평택항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
광양항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
부산항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	
유지 준설토사	부산 북항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	부산 감천항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	장항항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	광양 4항로	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	진해	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	마산	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	삼천	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	군산 (내항)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	군산 (외항)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
오염 우심 준설토사	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○	
개발 준설토사	군산항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	이판장	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	동부두	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	서부두	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	5부두	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○
	광양항	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	○

※ A: 위해성평가에 의한 기준, B: 준설토사 처리 및 활용기준, C: 토양환경보전법상의 기준

5. 결론

본 논문에서는 항만개발 및 건설공사로 인하여 발생하는 준설토사를 유효하게 활용하기 위하여 국내 주요 항만에 대한 오염물질 및 농도에 대하여 조사를 실시하였다. 노출경로별 시나리오를 작성하여 준설토물의 인간 건강에 대한 피해가능 확률을 추정하는 위해성 평가에 의해 오염기준을 제안하였다.

그리고 오염현황조사 및 문헌자료에 의한 준설토사의

오염도를 관련 기준과 비교·검토하여 유효활용 가능성을 평가하였다. 연구결과, 공업지역에서 준설토사를 유효활용할 경우, 노출경로별 위해도를 종합하여 제안된 실외노동자에 대한 발암성물질의 기준은 Cd 3.5mg/kg, As 1.76mg/kg, Cr 34.5mg/kg, PCBs 0.56µg/kg 그리고 비발암성 물질의 경우 Cu 54.1mg/kg, Hg 1.7mg/kg, Pb 57.5mg/kg, Zn 34.2mg/kg, T-N 790mg/kg, T-P 530mg/kg 이었다. 주거지역은 발암성물질의 기준은 Cd 1.7mg/kg, As 0.39mg/kg, Cr 26.7mg/kg, PCBs 0.32µg/kg 그리고

비발암성 물질의 경우 Cu 31.3mg/kg, Hg 1.3mg/kg, Pb 39.1mg/kg, Zn 23.5mg/kg, T-N 548mg/kg, T-P 188mg/kg 이었다.

준설토사의 위해성 평가를 통하여 제안된 기준은 준설토사 처리활용기준 및 토양환경보전법상의 기준보다 엄격하였다. 그리고 유효활용에 대한 사전평가를 실시할 수 있는 관련기준을 이용하여 국내 주요항만의 발생 준설토사에 대한 오염도를 평가한 결과 일부항만에서 카드뮴(Cd), 비소(As), 크롬(Cr) 및 아연(Zn)이 환경기준을 초과하는 것으로 나타나 정밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 나타났지만 대부분 항만에서 발생한 준설토사는 유효활용이 가능한 것으로 나타났다. 또한 인체에 대한 준설토사의 위해성 평가로부터 설정한 준설토사 유효활용 기준은 건설재료 등으로 준설토사를 직접 활용하고자 할 때 적합성 여부를 판단하기 위하여 향후 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단되었다. 그리고 오염도가 높은 준설토사의 경우 준설토사를 경량골재, 벽돌 및 시멘트에 의한 고형화 등으로 가공하여 처리 및 활용하거나, 인간에 대한 노출이 최소화될 수 있는 지하 충전재 등으로 유효활용 가능성을 크게 확대할 수 있을 것으로 평가된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부와 한국해양수산기술진흥원이 지원하는 “항만구조물 신뢰성 설계법 개발, PM48000” 연구과제와 한국해양연구원 기본과제인 “하구역 관리 및 기능회복 기술개발, PE98070” 연구비 지원하에 연구가 가능했으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국민표준체위 조사보고서 (1997), 산업자원부 기술표준원, <http://www.standard.arts.go.kr>.
2. 통계청 (2005), <http://www.nso.go.kr>.
3. 해양수산부 (1997), 해운항만 통계연보.
4. 해양수산부 (2003), 준설토물질 해양배출 평가체제 개발 연구용역, pp.150-168.
5. 해양수산부 (2004), 준설토 재활용 방안연구, 한국해양연구원 연구보고서.
6. 해양수산부 (2005), 해양오염퇴적물 조사 정화·복원체제 구축[2], pp.239-288.
7. 해양수산부 (2005), 해양환경공정시험방법.
8. 해양수산부 (2006), 해양오염퇴적물 조사지침서, 한국해양연구원.
9. 해양수산부 (2007), 준설토사 처리 및 활용 환경기준 개발, 한국해양연구원 연구보고서.
10. 환경부 (2005), <http://www.me.go.kr>.
11. IMO (2000), Final Report on Guidance on Assessment of Sediment Quality. IOC-UNEP-IMO Global Investigation of Pollution in the Marine Environment (GIPME).
12. US EPA (1992b), Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume 1: Human Health Evaluation Manual.
13. US EPA (1994), Health Risk Assessments for Superfund Sites: Fact Sheet, Environmental Protection Agency Region VIII Technical Guidance, USA.
14. US EPA (1994), Methods for Derivation of Inhalation Reference Concentrations and Application of Inhalation Dosimetry (EPA/600/8-90-066F), Environmental Protection Agency, Office of Health and Environmental Assessment, Washington, D.C., USA.
15. US EPA (1995), Drinking Water Regulations and Health Advisories, Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C., USA.
16. US EPA (1995), Risk-Based Concentration Table, Environmental Protection Agency Region III, PA, USA.
17. US EPA (1996), Soil Screening Guidance: Technical Background Document (EPA/540/R-95/128), Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.
18. US EPA (1996), Soil Screening Guidance: User's Manual, Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.

(접수일자 2007. 8. 23, 심사완료일 2008. 5. 13)